UDK 621.315.592.

NEYTRON-TRANSMUTACIYALÍQ LEGIRLENGEN KREMNIYDEGI TEŃ SALMAQLÍ EMES ZARYAD TASÍWShÍLARDÍŃ JASAW WAQTÍ

Jalelov Moyatdin Asanovich – *fizika-matematika ilimleriniń kandidatı*
moyatdin@mail.ru
Ájiniyaz atındaǵı Nókis mámleketlik pedagogikalıq institutı

ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НЕЙТРОННО-ТРАНСМУТАЦИОННОМ ЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Жалелов Моятдин Асанович – *кандидат физико-математических наук*
Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

NON-EQUILIBRIUM CARRIER LIFE TIME IN NEUTRON-TRANSMUTATION DOPED SILICON

Jalelov Moyatdin Asanovich – *Candidate of Physical and Mathematical Sciences*
Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz

Tayanch so‘zlar: kremniy, neytron-transmutatsion legirlash, NTL-Si, radiatsion nuqson, rekombinatsiya, termik yumshatish, zaryad tashuvchining yashash vaqti, solishtirma qarshilik, DLTS, MD-PICTS.

Rezyume. Neytron transmutatsiya usuli (NTL-Si) bilan legirlangan kremniyda zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga ta’sir etuvchi omillar ko‘rib chiqilgan. Issiqlik neytronlari 31P donorlarining hosil bo‘lishiga yordam beradi, tez neytronlar esa vakansiya tipidagi nuqsonlarni hosil qiladi. Nuqsonlar rekombinatsiyani kuchaytiradi, termik ishlov berish material xossalarini qisman tiklash imkonini beradi. Nurlanish sharoitlari, material tarkibi va nuqsonlar parametrlarini kompleks nazorat qilish taklif etildi.

Ключевые слова: кремний, нейтронно-трансмутационное легирование, НТЛ-Si, радиационный дефект, рекомбинация, термическое отжиг, время жизни носителя заряда, удельное сопротивление, DLTS, MD-PICTS.

Резюме. Рассмотрены факторы, влияющие на время жизни носителей заряда в кремнии, легированном методом нейтронной трансмутации (НТЛ-Si). Тепловые нейтроны способствуют образованию доноров ^{31}P, а быстрые нейтроны создают дефекты вакансионного типа. Дефекты усиливают рекомбинацию; термическая обработка позволяет частично восстановить свойства материала. Предложен комплексный контроль условий облучения, состава материала и параметров дефектов.

Key words: silicon, neutron transmutation doping, NTD-Si, radiation defect, recombination, thermal annealing, charge-carrier lifetime, resistivity, DLTS, MD-PICTS.

Summary. This review examines factors affecting carrier lifetime in neutron-transmutation-doped silicon (NTD-Si). Thermal neutrons form ^{31}P donors, while fast neutrons generate vacancy-type defects. These defects increase recombination, whereas thermal treatment can partly restore material properties. A combined assessment of irradiation conditions, material composition, and defect measurements is proposed.

Kirisiw. Neytron-transmutaciyalıq legirlew (NTL) kremniy kóleminde donor atomların yadro reakciyası arqalı payda etiwi sebepli ádettegi eritpeden legirlewge qaraǵanda joqarı fazadaǵı keńisliktegi bir teklilikti beriwi múmkin. Bul qásiyet úlken kesimli diodlar, tiristorlar, IGBT qurilmalar hám basqa joqarı quwatlıqtaǵı elementlerde elektr maydanınıń bir tegis bólistiriliwi ushın zárúr. Biraq donorlardıń payda bolıwı menen bir waqıtta reaktor spektriniń tez neytronlıq komponenti kristallıq pánjerede jılјıw nuqsanların payda etedi. Usı nuqsanlar rekombinaciya orayları sıpatında zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtın qısqartadı [1-5].

Sonıń ushın NTL procesin tek ǵana kerekli fosfor koncentraciyasına erisiw wazıypası sıpatında kóriw nadurıs. Materialdıń sapası keminde tórt óz ara baylanısqan faktor menen belgilenedi: dáslepki kremniydiń ximiyalıq hám strukturalıq jaǵdayı; termikalıq hám tez neytronlar spektri; nurlandırıw geometriyası hám de fluensı; qızıwdıń temperatura-waqıt rejimi. Bul maqalanıń maqseti usı faktorlardıń τ_{eff} ge tásirin ádebiyatlar tiykarında tallaw, bar nátiyjelerdiń qollanılıw shegaraların kórsetiw hám NTL-Si sıpatın bahalaw ushın isenimli qadaǵalaw sxemasın qáliplestiriwden ibarat.

Metodologiyası. Tallawǵa NTL procesiniń modelles-tiriliwi, iri quymalarda neytron aǵısınıń bir tekliligi, nurlanıw nuqsanları, qızıw hám zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtın ólshewge tikkeley baylanıslı jumıslar kirgizildi. Tiykarǵı maǵlıwmatlar 2016-2025-jıllar aralıǵındaǵılar alındı; fizikalıq interpretaciya hám ólshew metodologiyası ushın aldın basıp shıǵarılǵan tayanısh derekler de paydalanıldı. Izertlew túsinikleri «neutron transmutation doping silicon», «NTD silicon radiation defects», «carrier lifetime», «annealing», «MCNP6» (Monte Carlo N-Particle version 6), «SRIM» (Stopping and Range of Ions in Matter), «MD-PICTS» (Molecular Dynamics-Photo-Induced Transient Spectroscopy) hám «photoconductance» terminlerin qamtıp aldı. Derekler temaǵa tikkeley baylanıslılıǵı, recenziyalanǵan baspalarda basılǵanı, DOI yamasa turaqlı bibliografiyalıq identifikator bar ekenligi hám nátiyjeni tekseriw ushin metod detalları jeterli ekenligi boyinsha saylap alındı.

NTL procesiniń fizikalıq tiykarı. Tábiyiy kremniydegi ^{30}Si izotopı termik neytrondı jutqanda radioaktiv ^{31}Si payda boladı; ol β-ıdıraw arqalı turaqlı ^{31}P donorına aylanadı:

$$^{30}\mathrm{Si} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{31}\mathrm{Si} + \gamma; \quad {}^{31}\mathrm{Si} \rightarrow {}^{31}\mathrm{P} + \beta^- + \bar{\nu_e} \qquad (1)$$



1-súwret. NTL procesinde donor payda bolıwı hám radiaciyalıq zıyan jolı

Ápiwayılastırılǵan jaǵdayda payda bolatuǵın donorlar koncentraciyası $N_P \approx N_{30} \cdot \sigma_{th} \cdot \Phi_{th}$ menen bahalanadı. Bul jerde N_{30} - ^{30}Si atomlarınıń koncentraciyası, σ_{th}- termik neytron jutılıw kesimi, Φ_{th} - termik neytron fluensı. Usı jantasıw juqa yamasa ózin-ózi ekranlaw tásir kishi bolǵan jaǵday ushın qolaylı; úlken diametrli quymalarda neytron transportı, radial hám kósher boyınsha sóniw, burıw hám de ekran geometriyasın esapqa alıw shárt [1, 2].

Nurlanıw nuqsanları hám rekombinaciya. Tez neytronlardıń serpimli soqlıǵısıwları pánjere atomlarına awısıw energiyasın beredi. Birlemshi Frenkel jupları keyin ala vakanciya-kislorod (VO), vakanciya-fosfor (VP), divakanciya (V_2) hám quramalı klasterlerge aylanıwı múmkin. Olardıń energiya qáddileri qadaǵan etilgen zonada jaylassa, elektron hám geweklerdi gezek penen uslap, Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinaciyasın kúsheytedi. Termik islew berilmegen NTL-Si de bir neshe qaqpan dárejeleriniń MD-PICTS járdeminde anıqlanǵanlıǵı bul mexanizmniń eksperimentallıq dáliyli boladı [3].

Ólshenetuǵın zaryadtıń nátiyjeli jasaw waqtı kólem, bet hám radiaciyalıq nuqsanlar úleslerin birlestiredi:

$$1/\tau_{eff} = 1/\tau_{bulk} + 1/\tau_{surface} + 1/\tau_{rad} \quad (2)$$

Bul jerde τ_{eff} -zaryad tasıwshılardıń effektiv jasaw waqtı, τ_{bulk}- kólemlik jasaw waqtı, $\tau_{surface}$- bettegi jasaw waqtı, τ_{rad}- nurlanıwshınıń jasaw waqtı.

(2) ańlatpa ǵárezsiz rekombinaciya kanalları ushın paydalı ápiwayılastırıw bolıp tabıladı. Ol τ_{eff} tiń materialdıń turaqlı "san" emes ekenligin kórsetedi: shama betlik passivaciya, úlgi qalıńlıǵı, temperatura hám inekciya dárejesine baylanıslı. Sol sebepli hár qıylı laboratoriyalarda ólshengen zaryad tasıwshılardıń jasaw waqıtların tek birdey yamasa dúzetilgen sharayatlarda ǵana salıstırıw múmkin.

Termik qızdırıwdıń roli hám sheklewleri. Nurlandırıwdan keyingi qızdırıw eki wazıypanı atqaradı: elektr aktiv fosfor donorların qáliplestiriw hám kóshpeli radiaciyalıq nuqsanlardıń qayta birigiwin yamasa dissociaciyasın támiyinlew. Process kinetikası ádette Arrenius tipindegi baylanıs penen tárıyiplenedi:

$$k(T)=k_0 \exp(-E_a/k_B T) \quad (3)$$

Bul jerde k(T) - belgili bir nuqsan reakciyasınıń tezlik turaqlısı, E_a - aktivaciya energiyası, k_B - Bolcman turaqlısı ($\approx 1{,}38\times10^{-23}$ Dj/K yamasa $\approx 8{,}617\times10^{-5}$ eV/K). Bir universal "tolıq qızdırıw" temperaturası yamasa waqtı joq: VO, VP, V_2 hám klasterler túrli kinetikaǵa iye; kislorod, uglerod, fosfor hám metall aralaspaları reakciyalar jolın ózgertedi. Sonıń ushın temperaturanı arttırıw waqıttın qısqartıwı múmkin bolsa da, hádden tıs termik islew beriw jańa kompleksler yamasa termodonorlar payda bolıw qáwpin arttıradı. Támiyinlew rejimi anıq material partiyası ushın qarsılıq, τ_{eff} hám nuqsan spektri boyınsha tekseriliwi kerek [3, 4, 8].

Zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtın ólshew hám nátiyjelerdi talqılaw. Qisqa jaqtılıq impulsı artıqsha zaryad tasıwshılardı payda etkende hám bir dominant rekombinaciya kanalı bar bolǵanda sóniw $\Delta n(t)=\Delta n_0 \exp(-t/\tau)$ túrine jaqınlastırıladı. Kóp nuqsanlı, inekciyaǵa baylanıslı yamasa bet rekombinaciyası kúshli úlgide bolsa bir eksponent jeterli bolmawı múmkin. Sonıń ushın esapta tek ǵana τ shaması emes, al qozǵatıw sharayatı, inekciya dárejesi, bet passivaciyası, temperatura, úlgi qalıńlıǵı hám maslastırıw modelin de beriw kerek [6, 7].

1-kestede NTL-Si ushın qollanılıwı múmkin bolǵan usıllar wazıypası boyınsha ajıratılǵan. Áhmietli ayırmashılıq sonda, foto ótkizgishliktiń ıdırawı materialdıń integral rekombinaciya juwabın beredi, al DLTS hám MD-PICTS bolsa usı juwaptı júzege keltiretuǵın elektr aktiv qáddilerdi anıqlawǵa xızmet etedi. Demek, usıllar bir-birin almastırmaydı, olar túrli sorawlarga juwap beredi.

1-keste. NTL-Sı da zaryad tasıwshılar jasaw waqtı hám defektlerdi bahalaw usılları

Usıl	**Tiykarǵı nátiyje**	**Kúshli tárepi**	**Áhmiyetli sheklew**
PCD/ μ-PCD	τ_{eff} hám fazalıq karta	Tez, kontaktsız baqlaw	Bet hám ineksi-ya dárejesine sezgir
QSSPC	$\tau_{eff}(\Delta n)$	Ineksiyaǵa baylanıslı analiz	Optikalıq koef-ficient hám háreketsheǹlik modeli zárúr
PL/ TRPL	Nurlanıw intensivligi yamasa sóniw waqıtı	Kontaktsiz, kartalastırıw múmkin	Kalibrlew hám nurlanıwsız kanallar inter-pretaciyası kerek
DLTS	Duzaq beti, tutıw kesimi, koncentraciya	Kemisliktiń energetikalıq tábiyatın ajıratadı.	Diod dúzilisi hám temperatura skani kerek
MD-PICTS	Fotoindukciy alanǵan ótkinshi qáddiler	Joqarı qarsılıqlı materialǵa sáykes	Quramalı spek-trdi abaylap dekonvolyuciya-law zárúr

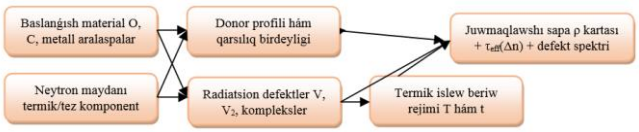
Zamanagóy jumıslardıń salıstırmalı analizi. Tańlap alıngan izertlewler NTL-Si mashqalasınıń úsh qatlamın kórsetedi: neytron maydanın basqarıw, radiaciyalıq zıyandı esaplaw hám nuqsanlardı eksperimentallıq anıqlaw. Matematikalıq hám Monte-Karlo modelleri nurlandırıwdan aldınǵı joybarlawdı qollap-quwatlaydı, biraq olar materialdaǵı haqiqiy aralaspalar hám keyingi qatıw nátiyjesin tolıq almastırmaydı. Kerisinshe, spektroskopiyalıq ólshewler nuqsandı anıqlaydı, biraq reaktor geometriya-sındaǵı sebepti ózi kórsetpeydi. Isenimli juwmaq usı eki qatlamdı birlestirgende payda boladı (2-keste).

2-keste. NTL-Si boyınsha saylap alınǵan izertlewlerdiń úlesi hám shegarası

Derek	**Obyekt hám usıl**	**Tiykarǵı úles**	**Pikir ushın sheklew**
2017, [1]	Nurlandırıw-dıń matema-tikalıq modeli	Quyma boyınsha donor profilin aldın ala bahalaw	Model para-metrleri anıq reaktor sharayatına baylanıslı
2016, [9]	B_4C filtri hám golder analizi	Aǵıs profilin konstruktivlik basqarıw	Qurılma geometriyasın basqa reaktorǵa tikkeley kóshiriw múmkin emes

2020, [4]	2-3 dyuymlı quyma ushın nurlandırıw qurılması	Aylandırıw hám suwıtıwdı bir sistemada kóriw	Konceptual joybar sanaat validaciyasına teń emes
2020, [3]	Termik islew berilmegen NTD-Si, MD-PICTS	Birneshe radiaciyalıq duzaqlardı ajıratıw	Termik islew berilgen materialdıń juwmaqlawshı sapasın tikkelep bermeydi
2023, [2]	WWR-K, 152,4 mm quyma, neytron ekranı	Kósher boyınsha tegis emeslikti 18% ten 3% ke shekem kemeytiw	Nátiyje usı reaktor, ekran hám geometriya ushın alınǵan
[5], 2023	MCNP6 + SRIM	Neytron spektrin awısıw ziyanı menen baylanıstırıw	DPA yamasa awısıw sanı τ_{eff} di ózi boljamaydı

Integrallasılǵan model. Ádebiyatlar analizinen kelip shıǵatuǵın tiykarǵı juwmaq - NTL-Si dıń juwmaqlawshı sıpatı bir parametr menen basqarılmaydı. Termik fluensa donor koncentraciyasın arttıradı, biraq tez neytron úlesi radiaciyalıq oraylar sanın kóbeytiwi múmkin. Dáslepki kislorod hám uglerod ayırım kemshiliklerdi uslaydı yamasa jańa kompleksler payda etedi. Termik islew beriw bolsa bir nuqsandı azaytıp, basqa komplekstiń rawajlanıwına sharayat jaratıwı múmkin (2-súwret). Sonlıqtan optimallastırıwdıń maqseti "kóbirek nurlandırıw" yamasa "joqarıraq temperatura" emes, al minimal rekombinaciyalıq nuqsan menen kerekli qarsılıq profilin alıw bolıp tabıladı.



2-súwret. NTL-Si sıpatın belgilewshi faktorlardıń sebepli modeli.

NTL-Si ushın usınıs etilgen baqlaw sxeması: Tallaw tiykarında texnologiyalıq qadaǵalawdı tómendegi basqıshlarda shólkemlestiriw maqsetke muwapıq:

1. Kiriw qadaǵalawı: baslanǵısh salıstırmalı qarsılıq, kislorod hám uglerod koncentraciyası, dislokaciyalar hám metall aralaspaları bahalanadi.

2. Nurlandırıwdı jobalastırıw: termikalıq hám tez neytron spektrleri óz aldına esaplanadı; quyma geometriyası, aylandırıw hám ekranlaw MCNP túrindegi transport modeli menen tekseriledi.

3. Aralıq qadaǵalaw: nurlanıw fluensı hám keńislik birdeyligi aktivacion indikatorlar yamasa kalibrlengen monitoring arqalı anıqlanadi.

4. Termik qayta islwdi optimallastırıw: temperatura-waqıt rejimi bir neshe sınaw noqatında qarsılıq, τ_{eff} hám nuqsan spektri boyınsha bahalanadı; tek qarsılıqtıń tikleniwi "tolıq termik qayta islew" dálili dep qabıl etilmeydi.

5. Juwmaqlawshı kvalifikaciya: radial hám kósher boyınsha ρ kartası, belgilengen quyma dárejesindegi τ_{eff} kartası hám de keminde bir tereń qáddi usılı birgelikte tallanadı.

6. Esabattıń tákirarlanıwshılıǵı: úlgi túri, qalıńlıǵı, bet halatı, temperatura, inekciya dárejesi, ásbap hám fitting modeli tolıq kórsetiledi.

Talqılaw. NTL-Si haqqındaǵı jumıslarda kóp ushırasatuǵın metodologiyalıq qátelik – salıstırmalı qarsılıqtıń tikleniwin radiaciyalıq nuqsanlar tolıq joǵalǵanlıǵınıń dáliyli dep qabıl etiw. Qarsılıq tiykarınan erkin zaryad tasıwshılardıń koncentraciyası hám hárekechеńligine juwap beredi; kishi koncentraciyadaǵı tereń rekombinaciya orayları bolsa qarsılıqtı keskin ózgertpey-aq τ_{eff} di sezilerli dárejede páseytiwi múmkin. Sol sebepli elektr qarsılıq hám jasaw waqtı bir birin tolıqtıratuǵın, biraq óz ara almastırılmaytuǵın ólshemler bolip tabıladı.

Ekinshi mashqala - hár qıylı ólshew usıllarınan alınǵan τ shamaların tikkeley salıstırıw. PCD, QSSPC, TRPL hám photo-μSR túrli tereńlik, waqıt masshtabı hám inekciya sharayatına sezgir. Hátte birdey plastinada bettiń passivaciyası ózgerse, τ_{eff} ózgeredi. Sonlıqtan keleshektegi jumıslar "jasaw waqtı pálen mks" sıyaqlı dara san menen sheklenbesten, $\tau_{eff}(\Delta n)$ baylanısı hám ólshew anıqsızlıǵın beriwi kerek [6, 7].

Úshinshi mashqala - model menen tájiriybe arasındaǵı úzilis. MCNP6 neytron spektrin hám fluensın, SRIM bolsa energiya joǵaltıwın hám awısıw qubılısların bahalawı múmkin [5]. Biraq bul nátiyjelerdi tikkeley τ_{eff} ge aylandırıw ushın nuqsan reakciyaları, aralaspalar hám qatıw kinetikasın qamtıp alıwshı aralıq model hám eksperimentallıq kalibrlew zárúr. Eń perspektivalı baǵdar reaktor modeli, nuqsan spektroskopiyası hám inekciyaǵa baylanıslı jasaw waqtı kartasın bir maǵlıwmatlar ağımında birlestiriw bolıp tabıladı.

Juwmaq. Analitikalıq sholıw NTL-kremniyde teń salmaqlı emes zaryad tasıwshılardıń jasaw waqtı donor koncentraciyasınıń ápiwayı funkciyası emes ekenligin kórsetti. τ_{eff} dáslepki material sapası, termikalıq hám tez neytronlar qatnası, nurlandırıwdıń keńisliktegi bir tekliligi, radiaciyalıq nuqsanlardıń quramı, bet halatı, inekciya dárejesi hám qızdırıw rejiminiń qosındı nátiyjesi bolıp tabıladı.

Neytron ekranları hám quymanı aylandırıw donor profiliniń bir tekliligin jaqsılaydı; MCNP6/SRIM modellestiriw radiaciyalıq júkti aldın ala bahalawǵa járdem beredi; MD-PICTS yamasa DLTS kemisliklerdiń energetik tábiyatin, PCD/QSSPC/TRPL bolsa rekombinaciyanıń integrallıq nátiyjesin kórsetedi. Sonıń ushın NTL-Si di isenimli bahalaw ρ kartası + $\tau_{eff}(\Delta n)$ + nuqsan spektroskopiyası úshligin talap etedi.

Ámeliy jaqtan eń áhmiyetli usınıs sol, qızdırıwdıń jetiskenligi tek salıstırmalı qarsılıqtıń tikleniwi menen bahalanbawı kerek. Joqarı sapalı NTL-Si alıw ushın kerekli donor koncentraciyası minimal tez-neytron zıyanlanıwı menen alınıwı kerek, termik qayta islew bolsa material partiyasına sáykes túrde kóp kriteriyalıq tájiriybe arqalı optimallasılıwı kerek.

Ádebiyatlar

1. Dshkhunyan V.L., Dyakov A.A., Karabanov S.M., Kozlov A.V., Markov D.V., Hoshino M. Mathematical Modeling of Silicon Doping by Neutron Transmutation Doping Method for High Efficient Solar Cells. // MRS Advances, 2017, 2(53). – P. 3135-3140.

2. Romanova N., Aitkulov M., Kisselyov K., et al. Neutron screen method for axial uniformity in silicon ingots for neutron transmutation doping at WWR-K reactor. // Annals of Nuclear Energy, 2023, 185:109697.

3. Engst C.R., Eisele I., Kutter C. Defect characterization of unannealed neutron transmutation doped silicon by means of deep temperature microwave detected photo induced current transient spectroscopy. // Journal of Applied Physics, 2020, 127(3):035704.

4. Salhi M., Mohammedi B., Laouar S., et al. Conceptual design of irradiation device for silicon neutron transmutation doping around Es-Salam research reactor. // Nuclear Science and Techniques, 2020, – P. 31-38.

5. Osmani N., Benkharfia H., Saad D. Neutron-induced damage simulations using MCNP6 and SRIM codes: Beyond neutron transmutation doping of silicon. // Annals of Nuclear Energy, 2023, 187:109795.

6. Sinton R.A., Cuevas A. Contactless determination of current–voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data. // Applied Physics Letters, 1996, 69. – P. 2510-2512.

7. Murphy J.D., Grant N.E., Pain S., et al. Carrier lifetimes in high-lifetime silicon wafers and solar cells measured by photoexcited muon spin spectroscopy. // Journal of Applied Physics, 2022, 132:065704.

8. Gaidar G.P. Peculiarities of changes in the structure and electrophysical characteristics of n-Si under the effect of various thermal treatment regimes. // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2020, (5). – P. 42-48.

9. Komeda M., Arai M., Tamai K., Kawasaki K. Design and burn-up analyses of new type holder for silicon neutron transmutation doping. // Applied Radiation and Isotopes, 2016, 113. – P. 60-65.

10. Ho H.Q., Honda Y., Motoyama M., et al. Proposal of a neutron transmutation doping facility for n-type spherical silicon solar cell at high-temperature engineering test reactor. // Applied Radiation and Isotopes, 2018, 135. – P. 12-18.